

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14edespoc.0230>

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA TRANSFORMACIÓN DE BIOGÁS EN ENERGÍA ELÉCTRICA

TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE TRANSFORMATION OF BIOGÁS INTO ELÉCTRICAL ENERGY

Monar-Villegas Libito Homero ¹; Hidalgo-Osorio William Armando ²;
Quinatoa-Caiza Carlos Iván ³

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

Correo: libito.monar4740@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6184-6472>

² Universidad Técnica de Cotopaxi. La Mana, Ecuador.

Correo: william.hidalgo7885@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6783-0947>

³ Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

Correo: carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-7480>

Resumen

El artículo tiene por objetivo realizar una evaluación técnica y económica de la transformación de biogás en energía eléctrica con el propósito de aprovechar de forma técnica el biogás que se produce en los rellenos sanitarios urbanos (RESU) y biodigestores, para transformarlo en energía eléctrica y establecer soberanía y diversificación eléctrica, y eliminar la dependencia de combustibles fósiles en el Ecuador. Para esto, se presenta el diseño y construcción, volumen útil de biogás producido cada año, potencia eléctrica útil de biogás y evaluación económica de los proyectos de generación de energía eléctrica en los RESU El Inga y Ceibales y del proyecto de biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi. El análisis técnico muestra que en el año 2021 el proyecto El Inga alcanzó el máximo volumen anual de biogás con un valor de 3405 m³/h y una potencia eléctrica anual de 7,24 MW; mientras que en el año 2031 el proyecto Ceibales alcanzará el máximo volumen anual de biogás con un valor de 1240,15 m³/h y una potencia eléctrica anual de 2,94 MW; en cambio, la implementación del proyecto de la ciudad de Machachi tendría un constante volumen anual de biogás de 312 m³/h y una potencia eléctrica anual de 1 MW; a su vez, los tres proyectos alcanzan una potencia eléctrica de 1 MW con flujos de volumen anual de biogás de 547,04 m³/h, 435,81 m³/h y 312 m³/h, con una desviación estándar de 117,58 m³/h y un coeficiente de variación del 27%. El análisis económico presenta que los proyectos: El Inga con una potencia actual (PA) de 5 MW su VAN es de 11301391,77 USD siendo mayor a cero y su TIR es del 21% mayor a su tasa de descuento (TD) del 8,5%; Ceibales con una PA de 1,8 MW su VAN es de 383865,48 USD siendo mayor a cero y su TIR es del 10% mayor a su TD del 8,6%; y Machachi con una PA de 1 MW su VAN es de 807668 USD siendo mayor a cero y su TIR es del 21% mayor a su TD del 10 %; son rentables. Se concluye que, la evaluación de los tres proyectos ofrece una solución técnica y económicamente viable en la transformación de biogás en energía renovable no convencional; ya que, al transformar 12,659 millones de toneladas acumuladas de residuos sólidos urbanos, 6581 m³ de excretas bovinas, porcinas y avícolas, se genera actualmente una potencia de 7,8 MW con una inversión de 15 millones de USD; lo cual, mediante la aplicación del artículo 413 de la constitución, donde el estado ecuatoriano está obligado a promover el desarrollo de energías renovables, se puede invertir alrededor de 5498 millones de USD para obtener una potencia eléctrica de 2859 MW que corresponde a la generación de energía eléctrica de fuentes no renovables, y así solventar el déficit de 890 MW para obtener soberanía de energía eléctrica en el Ecuador.

Palabras clave: Evaluación técnica de biogás en energía, evaluación económica de biogás en energía, evaluación de metano en energía, biogás de rellenos sanitarios, biogás de procesos de biodigestión, soberanía energética ecuatoriana mediante biogás.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de julio de 2024.

Fecha de aceptación: 05 de septiembre de 2024.

Fecha de publicación: 07 de octubre de 2024.



Abstract

This project aims at perform a technical and economic evaluation of the transformation of biogas into electrical energy with the purpose of technically taking advantage of the biogas produced in urban landfills (UL) and biodigesters, to transform it into electrical energy and establish sovereignty and electrical diversification, and eliminate dependence on fossil fuels in Ecuador. For this, the design and construction, useful volume of biogas produced each year, useful electrical power of biogas and economic evaluation of the electrical energy generation projects in the El Inga and Ceibales UL and the biodigester project located in the Machachi city. The technical analysis shows that in 2021 the El Inga project reached the maximum annual volume of biogas with a value of 3,405 m³/h and an annual electrical power of 7,24 MW; while in 2031 the Ceibales project will reach the maximum annual volume of biogas with 1240,15 m³/h and an annual electrical power of 2,94 MW; On the other hand, the implementation of the Machachi city project would have a constant annual volume of biogas of 312 m³/h and an annual electrical power of 1 MW; In turn, the three projects reach an electrical power of 1 MW with annual biogas volume flows of 547,04 m³/h, 435,81 m³/h and 312 m³/h, with a standard deviation of 117,58 m³/h and a coefficient of variation of 27%. The economic analysis shows that the projects: El Inga with a current power (CP) of 5 MW its NPV is 11301391,77 USD being greater than zero and its IRR is 21% greater than its discount rate (DR) of 8,5%; Ceibales with a CP of 1,8 MW its NPV is 383865,48 USD being greater than zero and its IRR is 10% greater than its DR of 8,6%; and Machachi with a CP of 1 MW its NPV is 807668 USD being greater than zero and its IRR is 21% greater than its DR of 10%; they are profitable. It is concluded that, the evaluation of the three projects offers a technically and economically viable solution in the transformation of biogas into non-conventional renewable energy; since, by transforming 12,659 million accumulated tons of urban solid waste, 6581 m³ of bovine, pig and poultry excreta, a power of 7,8 MW is currently generated with an investment of 15 million USD; which, through the application of article 413 of the constitution, where the Ecuadorian state is obliged to promote the development of renewable energies, around 5498 million USD can be invested to obtain an electrical power of 2859 MW, which corresponds to the generation of electrical energy from non-renewable sources, and thus solve the deficit of 890 MW to obtain electrical energy sovereignty in Ecuador.

Keywords: Technical evaluation of biogas in energy, economic evaluation of biogas in energy, methane in energy assessment, biogas from landfills, biogas from biodigestion processes, ecuadorian energy sovereignty through biogas.

1. Introducción

En el Ecuador con la construcción de los proyectos hidroeléctricos Coca Codo Sinclair, Sopladora, Manduriacu y Mazar Dudas, se obtuvo en el año 2016 soberanía en lo referente a energía eléctrica. Sin embargo, el constante crecimiento de la población, hasta el año 2024, donde se registran aproximadamente 18 millones de

habitantes, también ha generado por relación de proporcionalidad el aumento del consumo de energía eléctrica, generando en la actualidad un déficit de energía eléctrica que asciende a 890 megavatios hora, constituyéndose en el 19% de la demanda eléctrica del país que no está siendo cubierta (ARCERNR, 2024a) (CENACE, 2023).

Este déficit hace que sea necesario el planteamiento de soluciones que son obtenidas a partir del análisis del balance nacional de energía eléctrica, el mismo que tiene una potencia de generación eléctrica efectiva de 8254,45 MW y está constituida de la siguiente manera (ARCERNNR, 2024b).

- Energía renovable 5395,21 MW: hidráulica, eólica, fotovoltaica, biomasa, biogás.
- Energía no renovable 2859,24 MW: Motores de combustión interna, turbogas, turbovapor.
- Interconexión: 635 MW: Colombia y Perú.

Analizando este balance se tiene que la producción de energía eléctrica no renovable, que utiliza combustibles fósiles, es de 2859,24 MW, la misma que puede ser remplazada o incrementada en el balance nacional por energía renovable no convencional (ERNC) de tipo biogás, la cual es producida con apenas una potencia eléctrica de 7,2 MW (ARCERNNR, 2024b). De esta forma se cubriría el déficit y se obtendría soberanía respecto a energía eléctrica. Sin embargo, se puede establecer otras soluciones

como la construcción de centrales hidroeléctricas, pero en este proyecto de investigación se analizará la ERNC obtenidas a partir del biogás provenientes tanto de la biomasa de residuos sólidos urbanos (RSU) enterrados en rellenos sanitarios urbanos (RESU), como de la biomasa de excretas bobinas, porcinas y avícolas degradadas en un biodigestor.

La biomasa es la materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. La energía de la biomasa (bioenergía) es la energía que puede obtenerse de ella, bien sea a través de su quema directa o su procesamiento para conseguir otro tipo de combustible tal como el biogás (Sivabalan, 2021) (Comisión Nacional de Energía & GTZ, 2007). En el Ecuador los RSU y las excretas de animales deben ser aprovechados para general biogás.

El biogás es una mezcla de gases que proviene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, siendo su principal componente el metano (CH₄) el que debe encontrarse entre

el 45% al 70% para que sea inflamable, seguido de dióxido de carbono (CO₂) entre el 30% al 45%, nitrógeno (N₂) entre el 0% al 10%, hidrogeno (H₂) entre el 0% al 1%, oxígeno (O₂) entre el 0% al 2% y sulfuro de hidrógeno (H₂S) entre el 0% al 3%. El biogás es purificado y direccionado a turbinas de vapor, turbinas de gas o a motores de combustión interna para generar energía eléctrica (Carrasco, 2015).

En el Ecuador se recolectan en promedio 14394 toneladas de residuos sólidos al día (INEN, 2023); de los cuales el 35% se entierra en rellenos sanitarios, el 23,3 % en vertederos controlados y celdas emergentes, y el 41,7 % en botaderos a cielo abierto, ríos y quebradas; de los residuos generados el 57 % corresponde a residuos orgánicos y el porcentaje restante a residuos inorgánicos (Solíz et al., 2020). Mientras que, la cantidad promedio de residuos de excretas de animales bovinos, porcinos y avícolas es de 85656 toneladas al día, las mismas que son ubicadas en tanques o fosas para elaborar abono, o en otros casos son apiladas al aire libre sin ningún tratamiento (Bastidas, 2022) (INEC,

2021) (Morocho, 2012) (Mariscal, 2007).

Los rellenos sanitarios son creados para dar solución a los residuos generados por las poblaciones. La descomposición de los residuos orgánicos en el interior de las celdas creadas da como resultado la formación de biogás, el cual, por no tener estanquidad de las celdas, fuga hacia el exterior en forma de gas metano, dióxido de carbono y otros gases en menor proporción. De estos dos gases el más perjudicial para la capa de ozono es el metano, siendo la práctica común, para que no fugue directamente a la atmosfera, su combustión mediante la instalación de antorchas. Este biogás puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica (Solíz, 2020).

Los biodigestores son recipientes cerrados herméticamente en donde se depositan, en condiciones anaeróbicas y con cierta cantidad de agua, excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, restos orgánicos, residuos de cosechas y otros materiales que pueden descomponerse. En estos recipientes los restos fermentan por la acción de microorganismos

obteniéndose como producto final biogás y fertilizante orgánico rico en nutrientes (Comisión Nacional de Energía & GTZ, 2007) (Carrasco, 2015).

Los estudios realizados por la Comisión Nacional de Energía & GTZ, (2007) y Carrasco (2015) mencionan que los residuos de excretas bobinas, porcinas y avícolas, además de los RSU, tienen el mayor potencial de producción de biogás. Por este motivo, se seleccionaron este tipo de residuos para el desarrollo de este proyecto de investigación.

En la presente investigación se realizó una evaluación técnica de la cantidad de RSU; cantidad de excretas de animales bovinos, porcinos y avícolas; volumen útil de biogás, (flujo volumétrico) y potencia eléctrica útil de biogás; así como, la evaluación económica para determinar la rentabilidad de tres proyectos. Los tres proyectos para la evaluación técnica y económica de generación de energía eléctrica mediante la implementación de una planta de biogás tuvieron su desarrollo en los rellenos sanitarios El Inga y Ceibales, y en un

biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi.

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que; por medio de valores de volumen útil de biogás, potencia útil de biogás y datos económicos; de proyectos de generación de energía eléctrica se realizó una evaluación técnica y económica. Además, posee un alcance correlacional debido a la comparación de los valores de volumen útil de biogás, potencia útil de biogás y datos económicos entre los proyectos.

2. Proyectos de transformación de metano en energía eléctrica

A continuación, se presentan tres proyectos que serán comparados entre sí para la evaluación técnica y económica de la transformación de biogás en energía eléctrica. Los proyectos seleccionados son: Proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario El Inga, Proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario Ceibales y Proyecto de generación de energía eléctrica mediante la implementación de un

biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi.

2.1. Proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario El Inga

Para la evaluación técnica y económica de la transformación de biogás en energía se seleccionó el proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario El Inga, donde se presenta de manera sistematizada su diseño y construcción, el volumen útil de biogás producido cada año, la potencia eléctrica útil de biogás y su evaluación económica.

2.1.1. Diseño y construcción del relleno sanitario El Inga

El relleno sanitario El Inga está ubicado a 45 km de la ciudad de

Quito, la capital del Ecuador, situado específicamente en la parroquia de Pifo, fue creado después del cierre del antiguo botadero de basura a cielo abierto de Zámbriza, cerrado en el año 2002.

En la Tabla 1 se presentan las características técnicas con la que fue diseñado el relleno sanitario El Inga. Su diseño y construcción es de tipo trinchera. Su funcionamiento se distingue en dos etapas; la primera, a partir de enero del 2003 hasta mayo del 2007, con una extensión de 13 ha; la segunda, empezó en junio del 2007 por un período de 15 años a cargo de una fundación privada (Pérez & Ponce, 2013) (Crisanto, 2013).

Tabla 1. Características técnicas del relleno sanitario El Inga

Características del relleno	Valores
Año de operación	2003
Vida útil del relleno	22 años
Diseño del relleno	Tipo trincheras
Área del terreno	65 ha
Capacidad aproximada del relleno	10918791 t
Toneladas de residuos al día	2000 t/día
Promedio de residuos diarios por habitante	0,78 kg/día
Composición en física en porcentaje de peso de los desechos	50,5% material orgánico, 17% plástico, 14,4% textil, 5,7 % papel y cartón, 1,1% vidrio, 0,7% madera, 0,6% metales, 10% otros.

Fuente: Elaboración propia basada en (EMGIRS-EP, 2024) (EMGIRS-EP, 2023) (Crisanto, 2013)

2.1.2. Volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario El Inga

La cantidad de RSU depositados en el relleno sanitario El Inga se lo utiliza para realizar el cálculo del

volumen de biogás anual. En la investigación realizada por Crisanto (2013) se calculó el volumen de biogás generado al año. El cálculo se lo determina mediante la Ecuación 1 que es un modelo matemático de degradación de primer orden.

$$V_{\text{Biogás}} = 2 * Lo * R (e^{-k*c} - e^{-k*t})$$

(Ec. 1)

Donde:

$V_{\text{Biogás}}$: total de biogás generado en el año corriente (m^3).

Lo: potencial total de generación de CH_4 de residuos (m^3/Kg).

k: tasa anual de generación de CH_4 .

R: tasa promedio de recepción de residuos anual durante la vida activa (kg).

t: años desde que se abrió el relleno (años).

c: años desde que se cerró el relleno (años).

Una vez determinado el volumen de biogás en el año se lo multiplicó por un factor de recuperación del 60% hasta el año 2012, y por un factor de recuperación del 80% a partir del año 2013 hasta el año 2037, para posteriormente multiplicarlo por un factor de reducción del 10% y por un factor volumétrico de 0,622, con el propósito de obtener el volumen útil de biogás (volumen real aproximado) del relleno sanitario (Crisanto, 2013).

A partir del volumen útil anual se obtiene el flujo volumétrico en metros cúbicos por hora. La Tabla 2 presenta los valores de volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario El Inga.

Tabla 2. Volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario El Inga

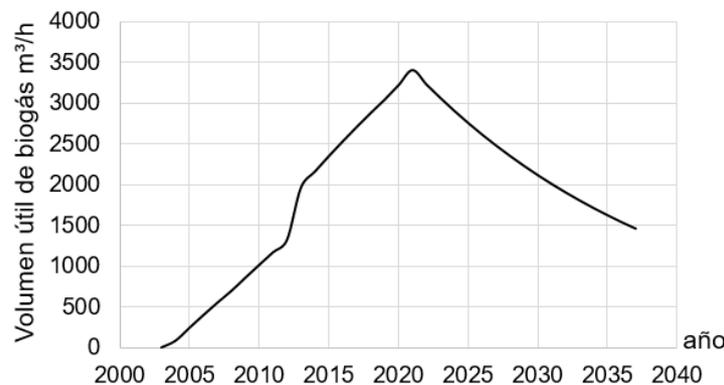
Año	Residuos acumulados t/año	Volumen útil de biogás m^3/h	Año	Residuos acumulados t/año	Volumen útil de biogás m^3/h	Año	Residuos acumulados t/año	Volumen útil de biogás m^3/h
2003	240000	0,00	2016	8009073	2530,45	2029	10918791	2228,48
2004	720000	80,98	2017	8697693	2706,98	2030	10918791	2113,34
2005	1220000	238,91	2018	9393199	2877,23	2031	10918791	2004,47
2006	1730000	395,50	2019	10137390	3041,65	2032	10918791	1900,98
2007	2240100	547,04	2020	10918791	3219,52	2033	10918791	1802,86
2008	2822500	691,19	2021	10918791	3405,00	2034	10918791	1709,67
2009	3423100	852,15	2022	10918791	3229,37	2035	10918791	1621,41
2010	4041900	1010,75	2023	10918791	3062,71	2036	10918791	1537,63
2011	4666898	1167,67	2024	10918791	2904,55	2037	10918791	1458,33
2012	5322098	1318,21	2025	10918791	2754,47	2038	10918791	0,00
2013	5983850	1961,91	2026	10918791	2612,44	2039	10918791	0,00
2014	6652219	2158,59	2027	10918791	2477,59			
2015	7327271	2348,11	2028	10918791	2349,90			

Fuente: Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013)

A partir de los datos de la Tabla 2 se graficó la curva de la Figura 1, donde se muestra el volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario El Inga. La Figura 1 presenta que en el año 2021 se alcanzó el máximo volumen anual de biogás producido, con un valor de

3405 m³/h; de ahí en adelante, la producción comienza su declive, hasta llegar al año 2037, donde el relleno sanitario termina la producción de biogás. Actualmente el volumen anual de biogás es de 2904,55 m³/h.

Figura 1. Volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario El Inga



Fuente: Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013)

2.1.3. Potencia eléctrica útil del biogás del relleno sanitario El Inga

La potencia eléctrica útil que genera el flujo volumétrico de biogás, obtenido del relleno sanitario, se la calculó mediante las Ecuaciones 2 y 3 (Crisanto, 2013). A continuación, se exponen las ecuaciones para su cálculo.

$$\text{Potencia eléctrica neta} = \text{Vol}_{\text{biogás}} \times \text{Peb} \times f \quad (\text{kWh})$$

(Ec. 2)

$$\text{Peb} = \% \text{ CH}_4 \times \text{valor calorífico} \quad (\text{kWh/m}^3)$$

(Ec. 3)

Donde:

Peb: potencial energético del biogás.

Vol_{biogás}: volumen de biogás (m³/año).

f: eficiencia promedio del motor de combustión interna con un valor del 38%.

% CH₄: % de concentración de metano en el relleno sanitario con un valor del 56%.

valor calorífico: valor calorífico del metano con un valor de 10 kWh/m³.

Una vez aplicadas las ecuaciones anteriores se obtuvo la potencia eléctrica útil que genera el volumen

de biogás. La Tabla 3 presenta la potencia eléctrica útil en cada año, a partir del biogás del relleno sanitario El Inga.

Tabla 3. Potencia eléctrica útil en cada año a partir del biogás del relleno sanitario El Inga

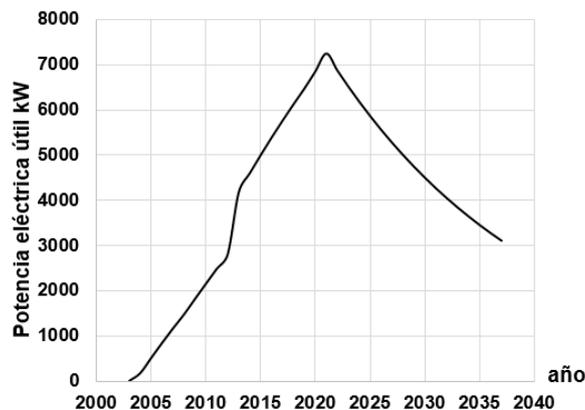
Año	Volumen útil de biogás m ³ /h	Potencia eléctrica útil del biogás kW	Año	Volumen útil de biogás m ³ /h	Potencia eléctrica útil del biogás kW	Año	Volumen útil de biogás m ³ /h	Potencia eléctrica útil del biogás kW
2003	0,00	0,00	2015	2346,93	4994,26	2027	2476,56	5270,11
2004	80,99	172,35	2016	2529,51	5382,80	2028	2348,72	4998,07
2005	238,79	508,14	2017	2705,71	5757,75	2029	2227,48	4740,07
2006	395,19	840,97	2018	2875,88	6119,88	2030	2112,49	4495,39
2007	546,89	1163,78	2019	3040,36	6469,89	2031	2003,45	4263,33
2008	690,80	1470,02	2020	3218,26	6848,46	2032	1900,03	4043,26
2009	851,67	1812,36	2021	3403,72	7243,11	2033	1801,95	3834,55
2010	1010,38	2150,10	2022	3228,02	6869,23	2034	1708,94	3636,61
2011	1167,05	2483,48	2023	3061,39	6514,64	2035	1620,72	3448,88
2012	1317,71	2804,09	2024	2903,36	6178,36	2036	1537,05	3270,85
2013	1961,06	4173,13	2025	2753,49	5859,42	2037	1457,71	3102,01
2014	2157,58	4591,32	2026	2611,36	5556,96			

Fuente: Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013)

A partir de los datos de la Tabla 3 se graficó la curva de la Figura 2 donde se presenta la potencia eléctrica útil a través de los años en el relleno sanitario El Inga. La Figura 2 muestra que en el año 2021 se alcanzó la máxima producción de energía con una potencia eléctrica

anual de 7243 kW; de ahí en adelante, la producción comienza su declive, hasta llegar al año 2037, donde el relleno sanitario está por terminar la producción de energía. Actualmente la potencia eléctrica útil tiene un valor de 6178 kW.

Figura 2. Potencia eléctrica útil a través de los años en el relleno sanitario El Inga



Fuente: Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013)

Establecidos los datos de la potencia útil del biogás, calculados a partir de la investigación de Crisanto (2013); su investigación procedió a realizar la selección del generador de corriente eléctrica con la asesoría de la Compañía Grupo Gasgreen, ya que, la misma extrae el biogás en conjunto con la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos, a partir del año 2016 (EMGIRS-EP, 2023) (MDMQ, 2022). La selección tomo en consideración una proyección de potencia eléctrica de aproximadamente 5 MW que se puede producir a partir del año 2016 como lo muestra la Figura 2. En base a esta comparativa, la Tabla 3 en el año 2016 da un resultado de potencia eléctrica útil de 5382,80

MW, confirmando que es factible generar la proyección de 5 MW que estableció la empresa Gasgreen S.A.

Con todo este análisis descrito en el párrafo anterior, la Compañía Grupo Gasgreen adquirió cinco motogeneradores modelo ECOMAX10 de marca AB Energy e impulsado por un motor de combustión interna. Cada generador produce una potencia de 0,918 MW que multiplicado por los 5 generadores adquiridos da como resultado 4,6 MW que se aproximan a la producción de los 5 MW proyectados por la empresa Gasgreen S.A. En la Tabla 4 se presenta las características técnicas del motogenerador ECOMAX10.

Tabla 4. Características técnicas del motogenerador ECOMAX10 (Crisanto, 2013)

Marca	Modelo	Tipo de gas	Vel. (rpm)	Frec. (Hz)	%de CH ₄	Emisión Nox	Potencia generada (KW/h)	Efi. total	CH ₄ (m ³ /h)	Asistencia técnica
AB Energy	ECOMAX10	Biogás	800	60	>50	2	918	96,7	603	Brasil

2.1.4. Evaluación económica del proyecto El Inga

La evaluación económica se la realiza a partir del trabajo de investigación de Crisanto (2013) con el asesoramiento de la Compañía Grupo Gasgreen.

El costo de la energía se lo determinó a partir de la REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11 (CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD, 2011), entidad estatal ecuatoriana que referencia el costo de la energía producida con

Recursos Energéticos Renovables No Convencionales, reconociendo al biogás como una parte de éste, estipulando un precio de energía eléctrica para este proyecto de 0,11 USD.

En la Tabla 5 se presenta los datos para la evaluación económica del proyecto de generación de 5 MW de energía eléctrica en el relleno sanitario El Inga. El costo de inversión para la instalación de la planta de generación de energía eléctrica es de 6035920,09 USD. Para el cálculo del VAN se utilizó una

tasa de descuento del 8,5% con un tiempo de análisis económico de 15 años.

La evaluación económica del proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario El Inga muestra que el valor actual neto (VAN) es mayor a cero mientras que la tasa interna de retorno (TIR) es mayor a la tasa de descuento del 8,5%. Por lo tanto, este proyecto es rentable, siendo el plazo de retorno de la inversión (Payback) de 3 años con 5 meses. Los Datos de este análisis se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos para la evaluación económica del proyecto de generación de 5 MW de energía eléctrica en el relleno sanitario El Inga

Potencia eléctrica	5 MW
Inversión	6035920,09 USD
Monto capital propio	2500000,00 USD
Financiamiento bancario	3535920,09 USD
Costo de generador de corriente	3649187 USD (5 generadores)
Duración financiamiento bancario	5 años
Tiempo de análisis económico	15 años
Ingreso por la venta de energía primer año	3494275,20 USD
Costo energía eléctrica	0,11 USD/kWh
Tasa de descuento	8,5%
VAN	11301391,77
TIR	21%
Payback	3 años con 5 meses

Fuente: Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013)

2.2. Proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario ceibales

Para la evaluación técnica y económica de la transformación de biogás en energía se seleccionó el proyecto de generación de energía

eléctrica en el relleno sanitario Ceibales, donde se presenta de manera sistematizada su diseño y construcción, el volumen útil de biogás producido cada año, la potencia eléctrica útil de biogás y su evaluación económica.

2.2.1. Diseño y construcción del relleno sanitario Ceibales

El relleno sanitario Ceibales está ubicado a 8 km del centro de la ciudad de Machala, este proyecto fue desarrollado para dar solución a los residuos generados por los habitantes de esa ciudad.

En la Tabla 6 se presentan las características técnicas con la que fue diseñado el relleno sanitario Ceibales. Su diseño y construcción es de tipo mixto con trincheras y áreas el mismo que entro en funcionamiento en el año 2010. El relleno tiene como proyección una vida de operación de 20 años.

Tabla 6. Características técnicas del relleno sanitario Ceibales

Características del relleno	Valores
Año de operación	2010
Vida útil del relleno	20 años
Diseño del relleno	Mixto tipo trincheras y áreas
Área del terreno	20,27 hectáreas
Capacidad del relleno	2737089 t
Toneladas de residuos al día	420 t/día
Promedio de residuos diarios por habitante	0,6 kg/día
Composición en física en porcentaje de peso de los desechos	69,3% material orgánico, 11,6% plástico, 7,3% papel y cartón, 3,8 vidrio, 3,3% textiles, 0,8% metales, 0,5% tetrabricks, 0,1% madera, 2,9% otros

Fuente: Elaboración propia basada en (Cruz, 2023) (Olmedo & Curillo, 2019) (Matamoros, 2007)

2.2.2. Volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario Ceibales

La cantidad de RSU depositados en el relleno sanitario Ceibales se lo utiliza para realizar el cálculo del volumen de biogás anual. La investigación realizada por Olmedo & Curillo (2019) calculó el volumen de biogás generado al año. El cálculo es un promedio de las Ecuaciones 4, 5 y 6, modelos matemáticos LandGem, IPCC y ecuatoriano respectivamente,

mientras que la Ecuación 7 es el volumen de biogás anual producto del promedio de los tres modelos matemáticos. A continuación, se exponen las ecuaciones para el cálculo del volumen.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 K * Lo \left(\frac{Mi}{10} \right) * e^{-K*t_{ij}}$$

(Ec. 4)

$$Q = \sum DDOCmi * [e^{-K*t}]$$

(Ec. 5)

$$Q = \sum_0^{nt} \frac{1}{\%Vol} K * M * Lo * e^{-K(t - t_{lag})}$$

(Ec. 6)

$$Q = (Q1 + Q2 + Q3) / 3$$

(Ec. 7)

Donde:

Q1: volumen de biogás en el año del cálculo modelo LandGem (m³/año).

Q2: volumen de biogás en el año del cálculo modelo IPCC (m³/año).

Q3: volumen de biogás en el año del cálculo modelo ecuatoriano (m³/año).

Q: volumen de biogás en el año del cálculo (m³/año)

i: incremento de tiempo saltos de un año.

n: (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)

j: incremento de tiempo en 0,1 años.

K: índice de generación de metano (1/año).

Lo: potencial de generación de metano (m³/Mg).

Mi: masa de residuos dispuestos en el año ith (Mg).

t_{ij}: edad de la sección jth de la masa de residuos (Mi) dispuestas en el año ith (años decimales).

t: tiempo en años.

DDOC_{mi}: masa de carbono orgánico degradable.

nt: número total de años modelado.

%Vol: porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.

M: masa de residuos dispuestos en el año (Mg).

t_{lag}: tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación de metano.

Una vez determinado el volumen de biogás al año se lo multiplicó por un factor de recuperación del 71%, con el propósito de obtener el volumen útil de biogás (volumen real aproximado) en el relleno sanitario Ceibales (Olmedo & Curillo, 2019).

A partir del volumen útil anual se obtiene el flujo volumétrico en metros cúbicos por hora. La Tabla 7 presenta los valores de volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario Ceibales.

Tabla 7. Volumen útil de biogás producido cada año a partir de los residuos del relleno sanitario Ceibales (Olmedo & Curillo, 2019)

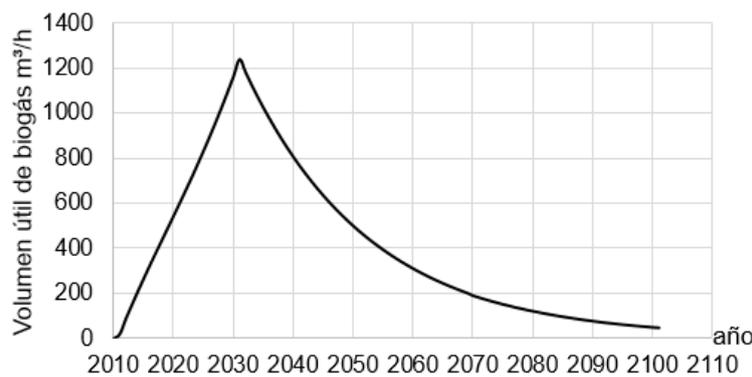
Año	Residuos acumulados t/año	Volumen útil de biogás m ³ /h	Año	Residuos acumulados t/año	Volumen útil de biogás m ³ /h
2010	0,0	0,00	2032	3162611,1	1182,03
2011	182496,1	20,04	2033	3162611,1	1126,65
2012	275789,1	87,20	2034	3162611,1	1073,88
2013	371263,8	148,64	2035	3162611,1	1023,59
2014	469534,0	209,15	2036	3162611,1	975,68

2015	571213,5	267,64	2037	3162611,1	930,02
2016	676916,1	324,60	2038	3162611,1	886,51
2017	787255,6	380,50	2039	3162611,1	845,05
2018	902845,8	435,81	2040	3162611,1	805,54
2019	1024300,5	491,03	2041	3162611,1	767,89
2020	1152233,5	546,31	2042	3162611,1	732,00
2021	1287258,6	602,05	2043	3162611,1	697,81
2022	1429989,6	658,54	2044	3162611,1	665,22
2023	1581040,3	716,07	2045	3162611,1	634,17
2024	1741024,5	774,89	2046	3162611,1	604,57
2025	1910556,0	835,23	2047	3162611,1	576,36
2026	2090248,6	897,30	2048	3162611,1	549,48
2027	2280716,1	961,30	2049	3162611,1	523,86
2028	2482572,3	1027,43	2050	3162611,1	499,44
2029	2696431,0	1095,84	2051	3162611,1	476,16
2030	2922906,0	1166,70	2052	3162611,1	453,98
2031	3162611,1	1240,15	2101	3162611,1	47,72

A partir de los datos de la Tabla 7 se graficó la curva de la Figura 3, donde se muestra el volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario Ceibales. La Figura 3 muestra que en el año 2031 se alcanzará el máximo volumen anual de biogás producido, con un valor de

1240,15 m³/h; de ahí en adelante, la producción comienza su declive, hasta llegar al año 2101, donde el relleno sanitario está por terminar la producción de biogás. Actualmente el volumen anual de biogás es de 774.89 m³/h.

Figura 3. Volumen útil de biogás producido cada año en el relleno sanitario Ceibales



Fuente: Elaboración propia basada en (Olmedo & Curillo, 2019)

2.2.3. Potencia eléctrica útil del biogás del relleno sanitario Ceibales

La potencia eléctrica útil que genera el flujo volumétrico de biogás,

obtenido del relleno sanitario, se calculó mediante las Ecuaciones 8, 9 y 10 (Olmedo & Curillo, 2019). A continuación, se exponen las ecuaciones para su cálculo.

$$P = E/8760h * fdp \text{ (kWh/año)}$$

(Ec. 8)

$$E = PCI_{\text{biogás}} * Qbr * \delta/\gamma \text{ (kWh/año)}$$

(Ec. 9)

$$PCI_{\text{biogás}} = \%CH_4 * PCI_{\text{metano}}$$

(Ec. 10)

Donde:

P = potencia eléctrica del elemento generador.

E = energía eléctrica disponible.

PCI_{biogás}: poder calorífico inferior del biogás.

%CH₄ = % de concentración de metano en el relleno sanitario con un valor del 50%.

PCI = Poder calorífico inferior del metano con un valor de 35,8 MJ/m³.

Qbr: caudal del biogás recuperable m³/año.

δ: eficiencia eléctrica del generador para transformar la energía térmica a energía eléctrica.

γ: factor de conversión de MJ a kWh (1MJ/0.28 kW h).

fdp: factor de disponibilidad de planta entre el 80% y 90%.

Una vez aplicadas las ecuaciones anteriores se obtuvo la potencia eléctrica útil que genera el volumen de biogás, la misma que es presentada en la Tabla 8 en donde se expone la potencia eléctrica útil en cada año a partir del biogás del relleno sanitario Ceibales.

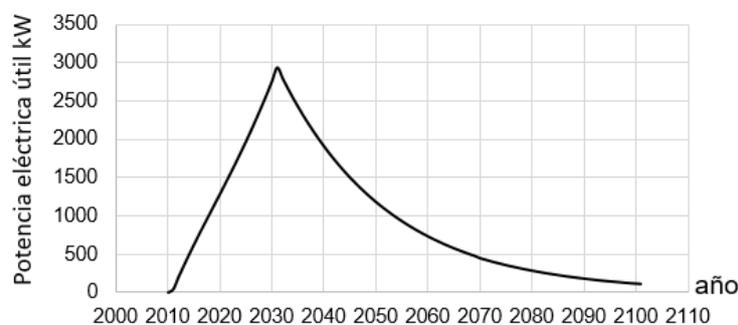
Tabla 8. Potencia eléctrica útil en cada año a partir del biogás del relleno sanitario Ceibales (Olmedo & Curillo, 2019)

Año	Potencia eléctrica útil kW	Año	Potencia eléctrica útil kW	Año	Potencia eléctrica útil kW
2010	0,00	2025	1980,96	2040	1910,54
2011	47,53	2026	2128,18	2041	1821,24
2012	206,83	2027	2279,99	2042	1736,14
2013	352,55	2028	2436,82	2043	1655,04
2014	496,05	2029	2599,08	2044	1577,75
2015	634,79	2030	2767,14	2045	1504,1
2016	769,88	2031	2941,35	2046	1433,9
2017	902,45	2032	2803,5	2047	1367
2018	1033,63	2033	2672,14	2048	1303,24
2019	1164,6	2034	2546,98	2049	1242,47
2020	1295,71	2035	2427,72	2050	1184,55
2021	1427,91	2036	2314,07	2051	1129,35
2022	1561,91	2037	2205,78	2052	1076,73
2023	1698,36	2038	2102,59	2101	113,19
2024	1837,86	2039	2004,25		

A partir de los datos de la Tabla 8 se graficó la curva de la Figura 4 donde se presenta la potencia eléctrica útil a través de los años en el relleno sanitario Ceibales. La Figura 4 muestra que en el año 2031 se alcanzará la máxima producción de energía con una potencia eléctrica

anual de 2803,50 kW; de ahí en adelante, la producción comienza su declive, hasta llegar al año 2101, donde el relleno sanitario está por terminar la producción de energía eléctrica. Actualmente la potencia eléctrica útil tiene un valor de 1837,86 kW.

Figura 4. Potencia eléctrica útil a través de los años en el relleno sanitario Ceibales (Olmedo & Curillo, 2019)



En la Figura 4 se observa que en el año 2019 ya se podía haber instalado un generador de corriente eléctrica de 1 MW de potencia, mientras que actualmente ya es factible instalar un segundo generador de 0,8 MW, con lo que se tendría una potencia de 1,8 MW.

Establecida de la potencia eléctrica útil a través de los años se procede a la selección del generador de corriente eléctrica. La selección toma en consideración que actualmente el biogás puede generar una potencia eléctrica de 1,8 MW, como lo muestra la Figura 4. En base a este valor se debe adquirir dos

motogeneradores modelo ECOMAX10 impulsado por un motor de combustión interna. Cada generador produce una potencia de 1,067 MW que multiplicado por 2 da como resultado 2,13 MW, de los cuales se requiere 1,8 MW.

La selección del motogenerador toma en cuenta que su motor de combustión interna tiene eficiencias del 32 al 45%, y pueden aportar potencias eléctricas de 0,1 MW a 1 MW, además, el costo de adquisición es menor en comparación a las de las microturbinas. En la Tabla 9 se presenta las características técnicas del motogenerador ECOMAX10.

Tabla 9. Características técnicas del motogenerador ECOMAX10 (Olmedo & Curillo, 2019)

Marca	Modelo	Procedencia	Frecuencia Hz	Potencia eléctrica kW	Eficiencia %	% CH ₄
AB Energy	Ecomax10	Brasil	60	1067	40,9	50

2.2.4. Evaluación económica del proyecto Ceibales

El costo de la energía se lo determinó a partir de los lineamientos de la Resolución No. ARCONEL-031/16 (ARCOTEL, 2016). La entidad estatal ecuatoriana ARCONEL estipuló un precio de energía eléctrica para este proyecto de 0,073 USD/kWh.

En la Tabla 10 se presentan los datos para la evaluación económica del proyecto de generación de 1,8 MW de energía eléctrica en el relleno sanitario Ceibales. El costo de inversión para la instalación de la planta de generación de energía eléctrica es de 3893624,2 USD. Para

el cálculo del VAN se utilizó una tasa de descuento del 8,6% con un tiempo de análisis económico de 15 años.

La evaluación económica del proyecto de generación de energía eléctrica en el relleno sanitario Ceibales muestra que el valor actual neto (VAN) es mayor a cero mientras que la tasa interna de retorno (TIR) es mayor a la tasa de descuento del 8,6%. Por lo tanto, este proyecto de generación eléctrica es rentable, siendo el plazo de retorno de la inversión (Payback) de 9 años y 2 meses. Los Datos para este análisis se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos para la evaluación económica del proyecto de generación de 1,8 MW de energía eléctrica en el relleno sanitario Ceibales

Potencia eléctrica	1,8 MW
Inversión	3893624,2 USD
Monto capital propio	Estatal
Financiamiento bancario	0
Costo de los 2 motogeneradores	1400000 USD
Tiempo de análisis económico	15 años
Ingreso por la venta de energía primer año	543620,51 USD (hasta 4to año) 978516,91 USD (a partir del 4to año)
Costo energía eléctrica	0,073 USD/kWh
Tasa de descuento	8,6%
VAN	383865,48
TIR	10%
PBP	9 años con 2 meses

Fuente: Elaboración propia basada en (Olmedo & Curillo, 2019)

2.3. Proyecto de generación de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi

Para la evaluación técnica y económica de la transformación de biogás en energía esta investigación desarrolló un proyecto de generación de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi, donde se presenta de manera sistematizada su diseño, el volumen útil de biogás producido al año, la potencia eléctrica útil de biogás y su evaluación económica.

2.3.1. Diseño del biodigestor

El cantón Mejía, por estar localizada en el centro norte de la región interandina del Ecuador, posee una privilegiada producción agrícola y ganadera. Las cifras de cabezas de ganado bobino y porcino suman 60831 en toda la extensión de su cabecera cantonal Machachi (Chacha, 2018) (Cisneros & Machuca, 2014). Esta cantidad de ganado genera pérdidas económicas debido a la acumulación de estiércol sobre los pastizales (Pinos et al., 2012). Se calcula que un animal bobino genera 40 kg/día de excretas mientras que un animal

porcino 3,5 kg/día de excretas (Morocho, 2012) (Mariscal, 2007), razón por la cual, en la ciudad de Machachi y alrededores, existe suficientes excretas para recoger y alimentar al biodigestor a ser diseñado, solucionando el problema en los pastizales.

En la Tabla 11 se presentan las características técnicas para la implementación de un biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi. Esta implementación se basa en la investigación realizada por Carrasco (2015), en donde se realizó la evaluación de una planta de biogás para abastecimiento energético, a partir del diseño de un biodigestor.

El proceso comienza con el depósito de excretas de animales bovinos, porcinos y avícolas, en el tanque de almacenamiento con capacidad volumétrica de 659 m³ y salida de flujo másico de excretas de 14000 kg/h, el flujo másico pasa por un molino, tornillo sin fin, tanque de mezcla e intercambiador de calor. Posteriormente, la mezcla de excretas con agua ingresa con un flujo másico de 14000 kg/h al biodigestor, con capacidad volumétrica de 6581 m³, donde permanecen con un tiempo de

retención hidráulico (THR) de 17,81 días para su degradación, obteniéndose un flujo másico de biogás de 461 kg/h, equivalente a un caudal de 505,9 m³/h que es depositado en un gasómetro. En la etapa final el biogás sale del gasómetro y entra al absorbedor,

para salir de él con un flujo de biogás de 294,9 kg/h, flujo que entra al enfriador para seguidamente salir con un flujo de 284,11 kg/h al cogenerador de energía de capacidad 1,04 MW (Carrasco, 2015).

Tabla 11. Características técnicas para la implementación de un biodigestor

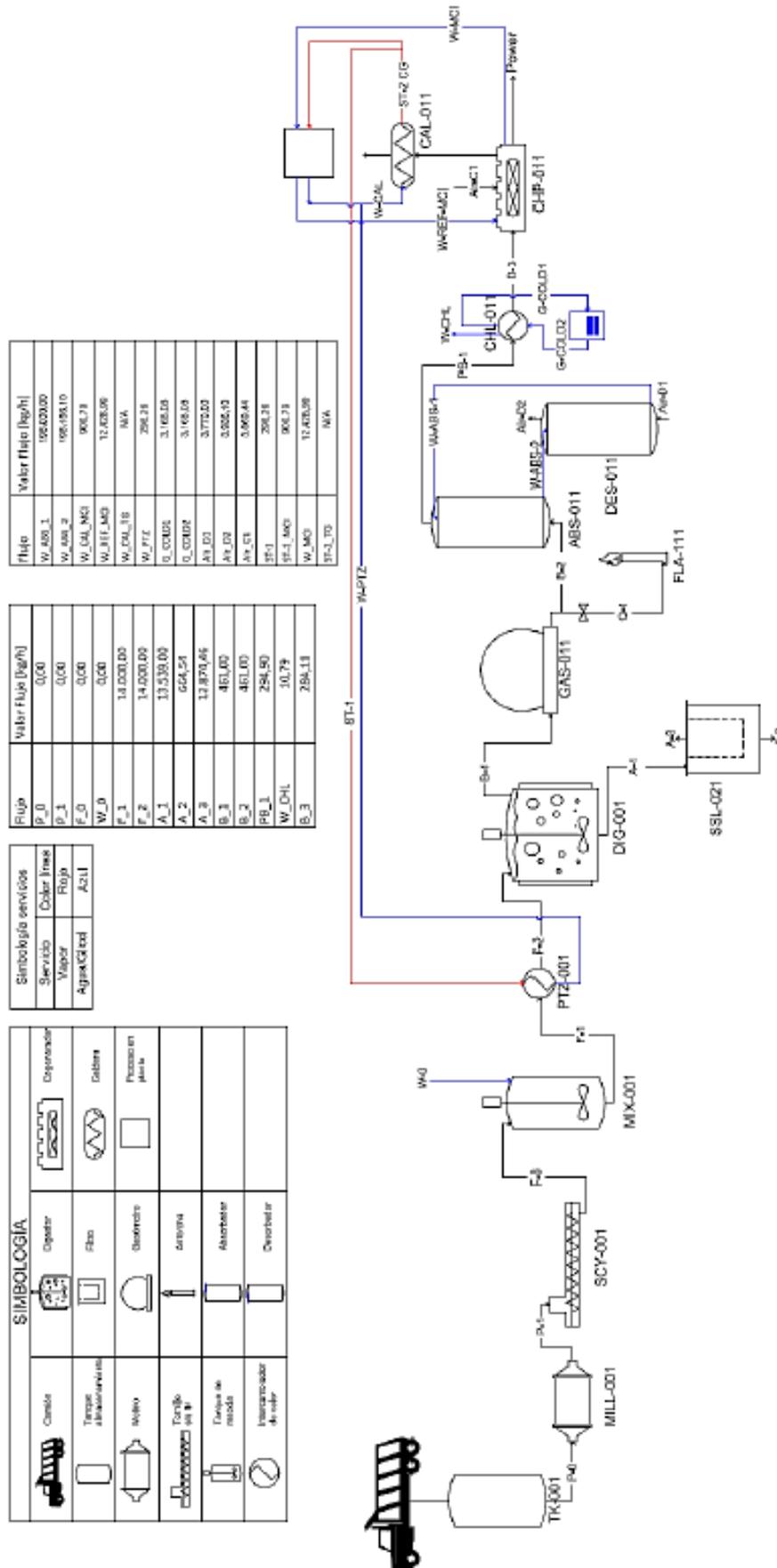
Características de los elementos	Valores
Tanque de almacenamiento capacidad volumétrica	659 m ³
Tanque de almacenamiento salida de flujo másico de excretas	14000 kg/h
Tanque de almacenamiento tiempo de autonomía	2 días
Molino capacidad de flujo másico de excretas	30000 kg/h
Tornillo sin fin capacidad de flujo másico de excretas	14000 kg/h
Tanque de mezcla capacidad volumétrica (excretas + agua)	7,72 m ³
Tanque de mezcla entrada de flujo másico de excretas	14000 kg/h
Tanque de mezcla entrada de flujo másico de agua	12250 kg/h
Tanque de mezcla diámetro	2,14 m
Tanque de mezcla tiempo de residencia (excretas + agua)	0,25 h
Intercambiador de calor (pasteurizador) capacidad de flujo másico de la mezcla (excretas + agua)	14000 kg/h
Biodigestor capacidad volumétrica	6581 m ³
Biodigestor entrada de flujo másico de la mezcla (excretas + agua)	14000 kg/h
Biodigestor entrada de caudal de la mezcla (excretas + agua)	13,73 m ³ /h
Biodigestor THR	17,81 días (427,51 h)
Biodigestor salida de flujo másico de biogás	461 kg/h
Biodigestor salida de caudal de biogás	505,9 m ³ /h
Biodigestor dimensiones	Ø = 25,59 m, L = 12,8 m
Biodigestor altura de la mezcla (excretas + agua)	11,41 m
Gasómetro capacidad volumétrica de biogás	1517,7 m ³
Gasómetro capacidad de flujo másico de biogás	461 kg/h
Gasómetro tiempo de residencia del biogás	3 h
Absorbedor entrada de flujo másico de biogás	461 kg/h
Absorbedor salida de flujo másico de biogás	294,9 kg/h
Absorbedor dimensiones	Ø = 0,42 m, L = 10,5 m
Enfriador entrada de flujo másico de biogás	294,9 kg/h
Enfriador salida de flujo másico de biogás	284,11 kg/h
Cogenerador entrada de flujo másico de biogás	284,11 kg/h
Cogenerador potencia generada de energía eléctrica	1,04 MW

Fuente: Elaboración propia basada en (Carrasco, 2015)

En la Figura 5 se presenta el diseño del biodigestor a ser ubicado en la ciudad de Machachi. En el diseño se observa el flujo del proceso de biodigestión con sus elementos constitutivos. La Tabla 11 muestra

las características técnicas del biodigestor.

Figura 5. Diseño del biodigestor (Carrasco, 2015).



2.3.2. Volumen útil de biogás producido al año en el biodigestor

A partir de las características técnicas del biodigestor diseñado se estima el volumen de biogás producido. Para esto, la investigación realizada por Carrasco (2015) calculó el volumen de biogás generado al año, en metros cúbicos por hora, que se obtiene del proceso de biodigestión. Como este proyecto de generación de energía es a partir del biogás producido en un biodigestor su flujo volumétrico va

ser el mismo durante todos los años de evaluación económica, a menos que se hagan un rediseño del mismo.

En la Tabla 12 se presenta el volumen de biogás producido anualmente por el biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi, el cual tiene un flujo volumétrico promedio de 311,87 m³/h. También la Tabla 12 muestra el flujo másico de los elementos y compuestos que integran el biogás.

Tabla 12. Volumen de biogás producido anualmente por el biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi (Carraco, 2015)

Elementos y compuestos del biogás	Flujo másico kg/h
CO ₂	81,23
CH ₄	186,80
N ₂	13,22
H ₂	2,83
H ₂ S	0,01
Flujo másico de biogás kg/h	284,11
Flujo volumétrico de biogás m ³ /h	311,87

2.3.3. Potencia eléctrica útil del biogás obtenido en el biodigestor

La potencia eléctrica útil que se va obtener del flujo volumétrico de biogás, producto del proceso de biodigestión, es calculada a partir de la Ecuación 11 y Ecuación 12. Al tener el biogás un proceso de purificado las ecuaciones no requieren de un factor de corrección.

Además, la potencia eléctrica útil es la misma durante todos los años de evaluación económica, debido al constante flujo volumétrico, a menos que se hagan un rediseño al biodigestor.

$$\text{Potencia eléctrica neta} = \text{Vol}_{\text{biogás}} \times \text{Peb} \times f \quad (\text{kWh})$$

(Ec. 11)

$P_{eb} = \% CH_4 \times \text{valor calorífico}$
(kWh/m³)

(Ec. 12)

Donde:

P_{eb} : potencial energético del biogás.

$Vol_{biogás}$: volumen de biogás es igual a 311,87 m³/h.

f : eficiencia del motor de combustión interna con un valor del 48%.

$\% CH_4$: % de concentración de metano que ingresa al cogenerador con un valor de 65,8%.

valor calorífico: valor calorífico del metano con un valor de 10 kWh/m³.

Remplazado los valores en las ecuaciones se tiene que la potencia útil es de 1018 kW (1,018 MW), generados a partir de un flujo de biogás de 311,87 m³/h. Con este valor de potencia se realiza la selección del equipo para generar energía eléctrica; tomando en cuenta que en las etapas de biodigestión se requiere de energía térmica para aumentar y disminuir la temperatura del proceso; razón por la cual, se selecciona un equipo de cogeneración con motor de combustión interna por estar dentro de los rangos de eficiencia y potencia eléctrica (Crisanto, 2013) (Carrasco 2015).

2.3.4. Evaluación económica del proyecto Machachi

La evaluación económica se realiza a partir del trabajo de investigación de Carrasco (2015), en donde se evaluó técnica y económicamente una planta de biogás con procesos de biodigestión, a partir de excretas de animales bovinos, porcinos y avícolas. En base aquella investigación se tomará las cifras económicas para evaluar el proyecto de generación de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor en la ciudad de Machachi.

En la Tabla 13 se presenta los datos para la evaluación económica del proyecto de generación de 1 MW de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor ubicado en la ciudad de Machachi. El costo de inversión para la instalación de la planta de generación de energía eléctrica es de 5134758 USD. Para el cálculo del VAN se utilizó una tasa de descuento del 10% con un tiempo de análisis económico de 15 años.

La evaluación económica del proyecto de generación de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor

ubicado en la ciudad de Machachi muestra que el valor actual neto (VAN) es mayor a cero, mientras que la tasa interna de retorno (TIR) es mayor a la tasa de descuento del 10%. Por lo tanto, este proyecto de

generación eléctrica es rentable, siendo el plazo de retorno de la inversión (Payback) de 4 años. Los datos para este análisis se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Datos para la evaluación económica del proyecto de generación de 1 MW de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor

Potencia eléctrica	1 MW
Inversión	5134758 USD
Monto capital propio	612970 USD
Financiamiento bancario	4521788 USD
Costo del cogenerador de corriente	1061305 USD
Duración financiamiento bancario	15 años
Tiempo de análisis económico	15 años
Ingreso por la venta de energía	520908 USD
Costo energía eléctrica	0,07 USD/kWh
Tasa de descuento	10%
VAN	807668 USD
TIR	21%
Payback	4 años

Fuente: Elaboración propia basada en (Carrasco, 2014)

3. Resultados y discusión

A continuación, para el análisis técnico se muestra la Tabla 14, la cual presenta el volumen útil y la

potencia útil de los proyectos de generación de energía eléctrica de los rellenos sanitarios El Inga y Ceibales, y del biodigestor ubicado en Machachi.

Tabla 14. Volumen útil y potencia útil de los proyectos de generación de energía eléctrica

Año	El Inga Volumen útil de biogás m ³ /h	Ceibales Volumen útil de biogás m ³ /h	Machachi Volumen útil de biogás m ³ /h	El Inga Potencia útil de biogás MW	Ceibales Potencia útil de biogás MW	Machachi Potencia útil de biogás MW
2003	0,00	---	---	0,00	---	---
2004	80,98	---	---	0,17	---	---
2005	238,91	---	---	0,51	---	---
2006	395,50	---	---	0,84	---	---
2007	547,04	---	---	1,16	---	---
2008	691,19	---	---	1,47	---	---
2009	852,15	---	---	1,81	---	---
2010	1010,75	0,00	---	2,15	0,00	---
2011	1167,67	20,04	---	2,48	0,05	---
2012	1318,21	87,20	---	2,80	0,21	---
2013	1961,91	148,64	---	4,17	0,35	---
2014	2158,59	209,15	---	4,59	0,50	---
2015	2348,11	267,64	---	4,99	0,63	---
2016	2530,45	324,60	---	5,38	0,77	---
2017	2706,98	380,50	---	5,76	0,90	---
2018	2877,23	435,81	---	6,12	1,03	---

2019	3041,65	491,03	---	6,47	1,16	---
2020	3219,52	546,31	---	6,85	1,30	---
2021	3405,00	602,05	---	7,24	1,43	---
2022	3229,37	658,54	---	6,87	1,56	---
2023	3062,71	716,07	---	6,51	1,70	---
2024	2904,55	774,89	312	6,18	1,84	1
2025	2754,47	835,23	312	5,86	1,98	1
2026	2612,44	897,30	312	5,56	2,13	1
2027	2477,59	961,30	312	5,27	2,28	1
2028	2349,90	1027,43	312	5,00	2,44	1
2029	2228,48	1095,84	312	4,74	2,60	1
2030	2113,34	1166,70	312	4,50	2,77	1
2031	2004,47	1240,15	312	4,26	2,94	1
2032	1900,98	1182,03	312	4,04	2,80	1
2033	1802,86	1126,65	312	3,83	2,67	1
2034	1709,67	1073,88	312	3,64	2,55	1
2035	1621,41	1023,59	312	3,45	2,43	1
2036	1537,63	975,68	312	3,27	2,31	1
2037	1458,33	930,02	312	3,10	2,21	1
2038	---	886,51	312	---	2,10	1
2039	---	845,05	312	---	2,00	1

% de concentración de metano en el relleno sanitario El Inga = 56%.

% de concentración de metano en el relleno sanitario Ceibales = 50%.

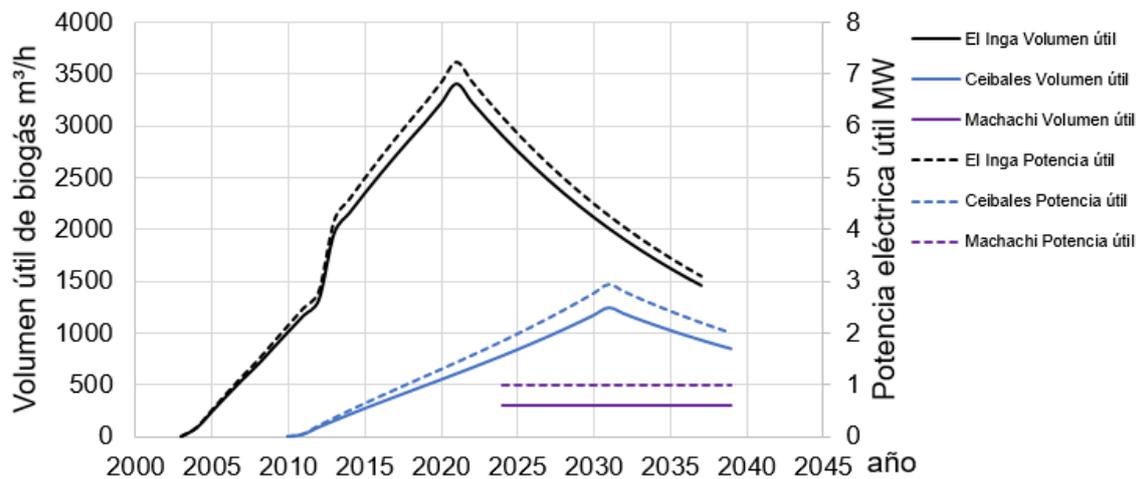
% de concentración de metano que ingresa al cogenerador proyecto Machachi = 65,8%.

Fuente: *Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013) (Olmedo & Curicho, 2019) (Carrasco, 2015)*

Los datos de la Tabla 14 provienen de la Tabla 2, Tabla 3, Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 12 e ítem 2.3.3. A partir de la Tabla 14 se grafican las curvas de

la Figura 6, donde se presenta el volumen útil y potencia útil de los proyectos de generación de energía para su análisis.

Figura 6. Volumen útil y potencia útil de los proyectos de generación de energía eléctrica



Fuente: *Elaboración propia*

El análisis técnico muestra que en el año 2021 el proyecto El Inga alcanzó el máximo volumen anual de biogás con un valor de 3405 m³/h y una

potencia eléctrica anual de 7,24 MW; mientras que en el año 2031 el proyecto Ceibales alcanzará el máximo volumen anual de biogás

con un valor de 1240,15 m³/h y una potencia eléctrica anual de 2,94 MW; en cambio, la implementación del proyecto de la ciudad de Machachi tendría un constante volumen anual de biogás de 312 m³/h y una potencia eléctrica anual de 1 MW; a su vez, los tres proyectos alcanzan una potencia eléctrica de 1 MW con flujos de volumen anual de biogás de 547,04 m³/h, 435,81 m³/h y 312 m³/h, con una desviación estándar de 117,58 m³/h y un coeficiente de variación del 27%.

La máxima potencia útil eléctrica producida en el relleno sanitario El Inga se logró en 19 años, mientras que en el relleno sanitario Ceibales se logrará en 22 años; esto da como

resultado que el tiempo de maduración de un relleno sanitario para producir una potencia máxima es en promedio 20,5 años.

A continuación, para el análisis económico de resultados se muestra la Tabla 15, la cual presenta datos para la evaluación económica de los proyectos de generación de energía eléctrica de los rellenos sanitarios El Inga y Ceibales, y del biodigestor ubicado en Machachi.

Los datos de la Tabla 15 provienen de la Tabla 5, Tabla 10 y Tabla 13, las mismas que contienen datos para la evaluación económica de los proyectos. A partir de la Tabla 15 se realiza el respectivo análisis económico.

Tabla 15. Datos para la evaluación económica de los proyectos de generación de energía eléctrica

Datos	El Inga 5 MW (año 2024)	Ceibales 1,8 MW (año 2024)	Machachi 1 MW (año 2024)
Inversión	6035920,09 USD	3893624,2 USD	5134758 USD
Costo de los generadores de corriente	3649187 USD (5 generadores)	1400000 USD (2 motogeneradores)	1061305 USD (1 cogenerador de corriente)
Tiempo de análisis económico	15 años	15 años	15 años
Tasa de descuento	8,5%	8,6%	10%
VAN	11301391,77 USD	383865,48 USD	807668 USD
TIR	21%	10%	21%
PBP	3 años con 5 meses	9 años con 2 meses	4 años

Fuente: Elaboración propia basada en (Crisanto, 2013) (Olmedo & Curicho, 2019) (Carrasco, 2015)

El análisis económico de los tres proyectos fue realizado a 15 años: en el proyecto El Inga con una

potencia actual de 5 MW su VAN es de 11301391,77 USD siendo mayor a cero y su TIR es del 21% mayor a

su tasa de descuento del 8,5%; en el proyecto Ceibales con una potencia actual de 1,8 MW su VAN es de 383865,48 USD siendo mayor a cero y su TIR es del 10% mayor a su tasa de descuento del 8,6%; y el proyecto Machachi con una potencia actual de 1 MW su VAN es de 807668 USD siendo mayor a cero y su TIR es del 21% mayor a su tasa de descuento del 10 %; por lo tanto los tres proyectos de generación eléctrica son rentables.

La inversión en el proyecto de generación de 1 MW de energía eléctrica mediante biodigestor es de 5,134 millones de USD, mientras que la inversión en el proyecto de generación de 5 MW es de 6,035 millones de USD, esta diferencia indica que los procesos de biodigestión a gran escala requieren de mayor inversión para obtener determinada capacidad de potencia eléctrica.

4. Conclusiones

Se concluye que, la evaluación de los tres proyectos ofrece una solución técnica y económicamente viable en la transformación de biogás en ERNC; ya que, al utilizar y

transformar 12,659 millones de toneladas acumuladas de RSU, 6581 m³ de excretas bovinas, porcinas y avícolas, se genera actualmente una potencia de 7,8 MW con una inversión de 15 millones de USD; lo cual, mediante la aplicación del artículo 413 de la constitución, donde el estado ecuatoriano está obligado a promover el desarrollo de energías renovables, se puede invertir alrededor de 5498 millones de USD para obtener una potencia eléctrica de 2859 MW que corresponde a la generación de energía eléctrica de fuentes no renovables, y así solventar el déficit de 890 MW para obtener soberanía de energía eléctrica en el Ecuador.

En el proyecto Machachi para generar 1 MW de energía eléctrica mediante procesos de biodigestión se requiere de un flujo de volumen de biogás de 312 m³/h; mientras que, en los proyectos El Inga y Ceibales para generar 1 MW de energía eléctrica, a partir de residuos sólidos depositados técnicamente en sus rellenos sanitarios, se requiere de un flujo de volumen de biogás de 471,27 m³/h y 435 m³/h, respectivamente; concluyendo que, los flujos de biogás son similares

para producir una potencia de 1 MW, pero, con el menor flujo correspondiente a 312 m³/h se logra producir la misma potencia, esto se debe a una mejor eficiencia de refinación del biogás en los proceso de biodigestión.

La comparación de la transformación de biogás a energía eléctrica mediante la descomposición de los residuos orgánicos en el interior de un relleno sanitario con la descomposición de excretas bobinas, porcinas y avícolas mediante biodigestor, evidencia que el mayor porcentaje de gas metano se produce en el proceso de biodigestión con un valor de 65,8%, lo que indica que, a partir del proyecto de generación de energía eléctrica mediante la implementación de un biodigestor se extrae mayor cantidad de gas metano.

La transformación de biogás en energía eléctrica del futuro ofrece una solución técnica y económicamente viable para el Ecuador, ya que, el país contiene abundantes residuos sólidos y residuos de excretas animales, que pueden ser utilizadas para

transformarlas en energía eléctrica de tipo renovable no convencional, a diferencia de proyectos termoeléctricos donde se utilizan combustibles líquidos importados como diésel y el fuel oíl para generar energía eléctrica no renovable.

Bibliografía

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD ARCOTEL. (2016). RESOLUCIÓN No. ARCONEL- 031/16. Ecuador: ARCOTEL.

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). (2024a). PANORAMA ELÉCTRICO 2024. ECUADOR: ARCERNNR.

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). (2024b). PANORAMA ELÉCTRICO 2024. ECUADOR: ARCERNNR.

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). (2024b). PANORAMA ELÉCTRICO 2024. ECUADOR: ARCERNNR.

- Bastidas Moreno, C. G. (2022). Análisis del potencial energético del estiércol de aves generada en la Granja Avícola Pujilí para la generación de energía de la empresa Incubandina ubicado en el sector de Chan cantón Pujilí provincia de Cotopaxi, 2022. Diseño de un biodigestor para la generación de biogás (Tesis de Maestría). Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Latacunga.
- Carrasco, J. (2015). EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO: UNA ESTRATEGIA PARA DIFERENTES CONTEXTOS (Tesis de Ingeniería). Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Centro Nacional de Control de la Energía – CENACE. (2023). Informe Anual Operador Nacional de Electricidad- CENACE. Ecuador: CENACE.
- Chacha, K. (2018). RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN EN EL DESARROLLO ECONÓMICO DE LAS PEQUEÑAS EMPRESAS GANADERAS DEL CANTÓN MEJÍA (Tesis de Ingeniería). ESPE. Latacunga.
- Cisneros, E., & Machuca, R. (2014). Estructuración de un modelo de encadenamiento productivo para la producción y comercialización de los productos derivados de la leche en la provincia de Pichincha, cantón Mejía (Tesis de Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana. Quito.
- Comisión Nacional de Energía & la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. (2007). Proyectos de biomasa Guía para la evaluación ambiental energías renovables no convencionales. Santiago de Chile: ByB Impresores.
- CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. (2011). REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11. Ecuador: CONELEC.
- Crisanto, L. (2013). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA CENTRAL ELÉCTRICA APROVECHANDO EL BIOGÁS GENERADO POR EL RELLENO SANITARIO DEL INGA (Tesis de Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana. Quito.
- Cruz, F. (2023, ene.11). Machala necesita un nuevo relleno sanitario a corto plazo. Diario correo. Recuperado de <https://diariocorreo.com.ec/79676/ciudad/machala-necesita-un-nuevo-relleno-sanitario-a-corto-plazo>

- Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS-EP. (2024). INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN SITIOS DE DESCARGA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. Quito: EMGIRS-EP.
- Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS-EP. (2023). Respuesta a solicitud de información - gas metano relleno sanitario del Inga Oficio Nro. EMGIRS-EP-GGE-2023-0496-O. Quito: EMGIRS-EP.
- INEC. (2003). Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos 2022. Quito: INEC.
- INEC. (2021). Encuesta de Producción Agropecuaria Continua (archivo Excel 2021). Quito: INEC. Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-produccion-agropecuaria-continua/>
- Mariscal, G. (2007). TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA REDUCIR EL POTENCIAL CONTAMINANTE DE LAS EXCRETAS DE GRANJAS PORCÍCOLAS, TRATAMIENTO EXCRETAS CERDOS. (1-9). Argentina: CENID Fisiología.
- Matamoros, E. (2007). Estudio de Impacto Ambiental "RELLENO SANITARIO DE LA CIUDAD DE MACHALA". Machala: Municipio de Machala.
- Morocho, M. (2012). Alternativas de Manejo para Reducir el Impacto Contaminante de las Excretas Bovinas en los Establos Lecheros (Tesis de Ingeniería). ESPOCH. Riobamba.
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito MDMQ. (2022). PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL MUNICIPAL DE RESIDUOS Y DESECHOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS Y DESECHOS SANITARIOS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO (2022-2032). Quito: MDMQ.
- Olmedo, J., & Curillo, J. (2019). VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO CEIBALES DE LA CIUDAD DE MACHALA (Tesis de Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca.

- Pérez, M., & Ponce, M. (2013). VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACM0001 PARA LA PROPUESTA DE UN PROYECTO MDL EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN MEJÍA (Tesis de Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional. Quito.
- Pinos, J., García., Peña, L., Rendón, J., González, C., & Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 359-370.
- Sivabalan, K., Hassan, S., Ya, H., & Pasupuleti, J. (2021). A review on the characteristic of biomass and classification of bioenergy through direct combustion and gasification as an alternative power supply. In *Journal of physics: conference series* (Vol. 1831, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- Solíz, M., Durango, J., Solano, J., & Yépez, M. (2020). CARTOGRAFÍA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN ECUADOR, 2020. Quito: Universidad Andina Simón Bolívar.